

무한요소를 사용한 층상지반에 놓인
스트립기초의 진동전파해석
Wave Propagation Analysis of a Strip Foundation
in Layered Soils using Infinite Elements

윤정방* · 김두기** · 김유진*** · 박종찬****
Yun, Chung-Bang · Kim, Doo-Kie · Kim, Yoo-Jin · Park, Jong-Chan

Abstract

In this paper, two dimensional vertical and corner infinite elements which can include multiple wave components to model underlying half space are developed. These elements are natural and economical to model underlying stiff half space or rock. To verify the behavior of these infinite elements, vertical, horizontal, and rocking compliances of a rigid strip foundation on a viscoelastic soil profile are analyzed and compared with those of Tzong and Penzien who used the boundary solution method. Good agreements are noticed between the two methods. The influence of material properties like Poisson's ratio, material damping, and stiffness ratio of layers as well as the influence of geometrical properties such as layer thicknesses and depth of foundation embedment are studied. Example analysis is carried out for the shaking table which is located in KIMM(Korea Institute of Machinery and Materials), and the vertical and horizontal displacements of the analysis are compared with the measured, and show good results and demonstrate the efficiency of the proposed method.

Keywords : infinite element, compliance, strip foundation, wave propagation, multiple wave components

1. 서론

지반-구조물의 상호작용해석에 있어서 외부영역으로의 파동의 전파에 대한 고려는 필수적이며, 이를 효과적으로 해결하기 위한 여러가지 외부영역의 모형화 방법이 개발되어왔다. 대표적인 외부영역의 모형화 방법으로는 전달경계법(Transmitting Boundary Method)⁽¹⁻³⁾, 경계해방법(Boundary Solution Method)⁽⁶⁻⁷⁾, 경계요소법(Boundary Element Method)⁽⁸⁻¹⁰⁾ 및 무한요소법(Infinite Element Method)⁽¹¹⁻¹⁸⁾를 들 수 있다.

이들 방법 중의 하나인 무한요소법은 유한요소를 사용하여 내부영역을, 무한요소를 사용하여 외부영역을 모형화하는 방법으로 무한요소의 형상함수는 주어진 문제의 무한영역에서의 해석함수를 근간으로 구한다. 이 방법은 Ungless⁽¹¹⁾와 Bettess⁽¹²⁾에 의해 처음으로 소개된 이후 반무한—탄성지반의 정역학적 문제(터널해석, 탄성지반처짐 등) 해석에 무한요소를 상용하여 해석한 논문들이 발표되었다.⁽¹³⁾ 반무한 탄성지반의 동역학적 문제를 해석하기 위해 1981년 Chow와 Smith⁽¹⁴⁾는 하나의 파만 전파할 수 있는 동적 무한요소를 제시하였고, 1982년 Medina와 Penzien⁽¹⁵⁾은 동시에 다중파동을 전파할 수 있는 무한요소를 개발하였다. 이들의 연구는 수평방향으로의 외부영역은 수평무한요소를 사용하며, 실린더형 외부영역의 외부는 방사형 무한요소를 사용하였다. 실린더형 내부영역을 가정하므로, 실린더형 파면을 가진 2차원 상의 물체파의 외부영역으로의 전파를 쉽게 고려할 수 있었다.

* 정회원·한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정회원·한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
**** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

반면에, Chow와 Smith⁽¹⁶⁾과 Zhang와 Zhao⁽¹⁷⁾은 반무한영역을 묘사하기 위해 수직과 모서리무한요소를 사용한 세분화방법을 제시하였다. 이들의 연구는 수평과 방사형 무한요소를 사용하는 것보다 자연스럽고 경제적이다. 그러나, 이들의 정식화에서 무한요소에 사용된 파동의 수는 1개였으므로, 다중파동함수를 고려한 수직 및 모서리 무한요소에 대한 정식화가 요구되었다.

본 논문에서는 2차원에서의 다중파동함수를 고려한 수직 및 모서리 무한요소를 개발하였으며, 경계해방법을 사용한 Tzong와 Penzien의 수치해석결과와 비교하였으며, 두 결과가 서로 잘 일치하였다. 예제해석으로 한국기계연구원 구조실험동의 진동대에 대하여 수치해석을 수행한 후 계측결과와 비교함으로써 본 연구에서 개발한 무한요소가 매우 효율적임을 알 수 있었다. 최근에 다중파동함수를 사용한 수직 및 모서리 축대칭 무한요소가 Yun과 Kim⁽¹⁸⁾에 의해 개발된 바 있다.

2. 지배방정식

x-z 평면내에서의 파동전달문제를 고려하기 위해 평면외 변형인 y방향으로의 변위는 없다고 가정한다. 즉, 파동의 전파, 굴절 및 무한영역으로의 방사는 x-z 평면내에서 국한된 것으로 한다. x-z 평면내의 파동전달문제에서의 파동전달방정식은 P-파와 S-파의 독립적인 성분으로 다음과 같이 분리할 수 있다.^(19,20)

$$c_p^2 \nabla^2 \phi = \ddot{\phi}, \quad c_s^2 \nabla^2 \psi_y = \ddot{\psi}_y \quad (1)$$

여기서 ϕ 와 ψ_y 는 스칼라포텐셜과 벡터포텐셜의 y방향성분이고, λ 와 μ 는 Lamé의 상수이며, c_p 와 c_s 는 $\sqrt{(\lambda+2\mu)/\rho}$ 와 $\sqrt{\mu/\rho}$ 로 지반의 물성치로 결정되는 지반에서의 P-파와 S-파의 전파속도이다.

3. 물체파의 전파

가진 진동수 ω 의 평면내 조화진동에 의한 정상상태의 물체파는 반경방향으로 전파한다. 이 경우에는 물체파에 의한 변위는 반경 r만의 함수이므로 원통형좌표계 (r, θ , z)에서 z축으로의 변위와는 무관한 Navier 방정식의 해를 구하는 문제이다. Helmholtz 정리를 사용하여 변위를 독립적인 두 개의 포텐셜로 표현한 후, Navier 방정식의 해를 구하면, P-파와 S-파에 관련되고, 반경만의 함수인 된 아래와 같은 2개의 독립된 Bessel 방정식을 구할 수 있다.

$$R'' + \frac{1}{r}R' + (k_p^2 - \frac{1}{r^2})R = 0, \quad S'' + \frac{1}{r}S' + (k_s^2 - \frac{1}{r^2})S = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 해는 1차 1, 2종 Hankel 함수의 조합으로 다음과 같다.

$$R(r) = AH_1^{(1)}(k_p r) + BH_1^{(2)}(k_p r), \quad S(r) = CH_1^{(1)}(k_s r) + DH_1^{(2)}(k_s r) \quad (3)$$

여기서 $H_1^{(1)}$ 은 r축의 내부로 향하는 파를 나타내므로 상수 A와 C는 0이며 식 (3)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(r) = BH_1^{(2)}(k_p r), \quad S(r) = DH_1^{(2)}(k_s r) \quad (4)$$

여기서 상수 B와 D는 경계조건으로부터 구할 수 있다.

$k_p r \rightarrow \infty$ 이고 $k_s r \rightarrow \infty$ 일때 식 (4)는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$R(r) \approx \tilde{B} \sqrt{\frac{2}{\pi r}} e^{-ik_p r}, \quad S(r) \approx \tilde{D} \sqrt{\frac{2}{\pi r}} e^{-ik_s r} \quad (5)$$

4. Rayleigh파의 전파

가진 진동수 ω 에 대한 정상상태에서의 조화진동에 대한 파동전달방정식의 Rayleigh 파에 대한 일반해는 다음과 같다.

$$\phi = (Ae^{-\mu_p x} + Be^{\mu_p x})e^{i(\omega t - kx)}, \quad \psi = (Ce^{-\mu_s x} + De^{\mu_s x})e^{i(\omega t - kx)} \quad (6)$$

여기서 k , k_p 와 k_s 는 각각 x 방향, P-파와 S-파의 파동수이고, μ_p 와 μ_s 는 $\sqrt{k^2 - k_p^2}$ 와 $\sqrt{k^2 - k_s^2}$ 이며, A,B,C,D는 하중조건에 의하여 결정되는 상수들이다. 이 경우에 변위와 응력을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \tau_{xz} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -ik & -ik & \mu_s & -\mu_s \\ -\mu_p & \mu_p & -ik & -ik \\ i2kG\mu_p & -i2kG\mu_p & -G(2k^2 - k_s^2) & -G(2k^2 - k_s^2) \\ G(2k^2 - k_s^2) & G(2k^2 - k_s^2) & i2kG\mu_s & -i2kG\mu_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\mu_p x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\mu_p x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\mu_s x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\mu_s x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - kx)} \quad (7)$$

5. 무한요소

수평적층된 상부의 지반과 하부의 반무한지반으로 이루어진 지반-구조물의 상호작용문제를 해석하기 위해 수평적층지반은 수평무한요소를, 하부의 반무한지반은 수직무한요소와 모서리무한요소를 사용하여 모형화하였다. 수평과 수직무한요소는 내부영역과 외부영역의 경계면에서 3개의 절점을 가지며, 모서리무한요소는 1개의 절점을 가진다. 또한 이들 무한요소들은 외부로 전파하는 파동의 형상에 해당하는 형상함수를 사용하였다.

각 무한요소에 사용된 국지좌표계는 그림 1과 같으며, 국지좌표계에서 전체좌표계로의 좌표 변환은 아래의 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$r = r_0(1 + \xi), \quad z = \sum_{j=1}^N L_j(\eta)z_j \quad : \text{수평무한요소}((r, z) \in \Omega_H^*) \quad (8a)$$

$$r = r_0(1 + \xi), \quad z = z_0 - \zeta \quad : \text{모서리무한요소}((r, z) \in \Omega_C^*) \quad (8b)$$

$$r = \sum_{j=1}^N L_j(\eta)r_j, \quad z = z_0 - \zeta \quad : \text{수직무한요소}((r, z) \in \Omega_V^*) \quad (8c)$$

여기서 $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, \infty)$, $\zeta \in [0, \infty)$ 이다.

외부로 전달하는 파동의 형상을 고려한 형상함수와 일반좌표를 사용하여 변위를 다음과 같이 근사하였다.

$$\mathbf{u}(r, z; \omega) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M N_{jm}(\omega) \mathbf{p}_{jm}(\omega) \quad (9)$$

여기서 N 과 M 은 무한요소의 절점과 파동함수의 갯수이고, N_{jm} 과 \mathbf{p}_{jm} 은 무한요소의 형상함수와 일반좌표이다.

변위를 근사하는데 사용된 형상함수는 다음과 같다.

$$N_{jm}^H(\xi, \eta; \omega) = L_j(\eta) f_m(\xi; \omega) \quad : \text{수평무한요소} \quad (10a)$$

$$N_{jm}^C(\zeta, \xi; \omega) = f_j(\xi; \omega) g_m(\zeta; \omega) \quad : \text{모서리무한요소} \quad (10b)$$

$$N_{jm}^V(\zeta, \eta; \omega) = L_j(\eta) g_m(\zeta; \omega) \quad : \text{수직무한요소} \quad (10c)$$

식 (10)에서 사용된 파동함수 $f_j(\xi; \omega)$ 와 $g_m(\zeta; \omega)$ 는 각각 수평과 수직방향의 파동전달형상을 근사화하기 위한 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$f_j(\xi; \omega) \in \{e^{-(\alpha + ik_p)\xi}, e^{-(\alpha + ik_p)\xi}\} \oplus \{e^{-ik_p \xi}\}_{m=1}^{N_j}$$

6. 수치적 검증

수치적 검증과 매개변수해석 및 고찰을 위해 사용한 표면 및 물힌 스트림기초와 이들의 모형화를 그림 2와 3에 보였다. 외부영역은 수평, 수직 및 모서리 무한요소를 사용하여, 내부영역은 9절점 평면변위요소를 사용하여 모형화하였으며, 유한요소의 최대크기는 해석상 최고주파수의 전단파장의 1/5 크기이다. 특별한 경우를 제외하면 대부분의 해석에 사용한 해석모형의 재료감쇠비(ξ)와 포아송비(ν)는 각각 0.05와 1/3이고, H/a 는 2이며, 물힌기초의 물힌깊이는 $E/a=2$ 이다. 또한, 층상지반의 경우에 있어서 층간강성차이는 $c_s^{(2)}/c_s^{(1)}=3$ 이고, 반무한영역으로의 에너지 방사를 고려하기 위해 사용한 물체파와 Rayleigh 파의 갯수는 각각 1개이다.

층상 반무한지반의 위에 놓인 표면기초의 수직, 수평 및 회전변위에 관한 compliance를 구한 후 Tzong과 Penzien⁽²¹⁾의 수치해석결과와 비교하였으며, 그 결과를 그림 4에 보였다. 결과에서 알 수 있듯이 두 연구결과는 모든 주파수 영역에서 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서 가로축은 전단파속도를 기준으로 나타낸 상대적인 값인 무차원 주파수이다.

7. 매개변수해석 및 고찰

7.1 포아송비

포아송비를 0.250, 0.333, 0.490으로 증가시켜 가면서 표면기초와 물힌기초에 대하여 매개변수해석을 하였다. 전반적으로 포아송비가 증가할수록 지반의 compliance는 전 주파수영역에 걸쳐서 감소하는 경향을 보였다. 포아송비는 지반의 부피변화율과 관련되어 있으므로 주로 P-파에 가장 큰 영향을 주므로, P-파가 지배적인 수직변위에 관한 compliance가 가장 크게 감소하였다. 물힌기초의 compliance의 변화경향은 표면기초와 매우 유사하였으나, 그 크기의 감소는 표면기초보다 적었다.

7.2 재료감쇠

재료감쇠비를 0.00, 0.05, 0.10으로 증가시켜 가면서 표면기초와 물힌기초에 대하여 매개변수해석을 하였다. 재료감쇠가 증가하면 균일 반무한지반의 경우에는 전 주파수영역에서 compliance는 감소하였고, 실수부가 허수부에 비해 두드러지게 감소하였으며, 저주파수영역이 고주파수 영역보다 큰 감소를 보였다. 또한, 층상 반무한지반의 compliance의 경우에는 공진주파수의 peak 값을 크게 감소시켜 완만한 형태의 compliance를 보였다. 물힌기초의 compliance의 변화경향은 표면기초와 매우 유사하였으나, 그 크기의 감소는 표면기초보다 적었다.

7.3 층간 강성차이

층간 강성비인 $c_s^{(2)}/c_s^{(1)}$ 를 1.0, 3.0, 10.0, ∞ 로 증가시켜 가면서 표면기초와 물힌기초에 대하여 매개변수해석을 하였다. 층간 강성비인 $c_s^{(2)}/c_s^{(1)}$ 가 증가할수록 compliance의 peak 값은 증가하며, 공진주파수는 고주파수영역으로 이동하였다. 물힌기초의 compliance의 변화경향은 표면기초와 유사하였으나, compliance의 크기와 변화경향은 표면기초보다 적었다.

7.4 층깊이

암반층의 깊이인 H/a 를 1, 2, 3, 4, ∞ 로 증가시켜 가면서 표면기초와 물힌기초에 대하여 매개변수해석을 하였다. 암반위에 놓인 층의 깊이가 증가할수록 공진주파수는 저주파수영역으로 이동하였고, 그 크기는 증가하였다. 균일반무한지반의 compliance에 접근하였다. 물힌기초의 compliance의 변화경향은 표면기초와 매우 유사하였으나, 그 크기의 감소는 표면기초보다 적었다.

7.5 물힌 깊이

기초의 물힌 깊이인 E/a 를 0, 1, 2, 3으로 증가시켜 가면서 균일반무한지반과 암반층상지반에 대하여 매개변수해석을 하였다. 물힌 깊이가 증가할수록 compliance의 크기는 감소하였으며, 암반층상지반의 경우에는 공진주파수가 고주파수영역으로 이동하였다. 이것은 물힌 깊이가 증가할수록 기초와 지반과의 접촉면적의 증가로 지반의 감쇠가 증가하고, 암반층상지반의 경우에는 기저층과 기초밀면과의 거리가 감소하기 때문으로 판단된다.

8. 예제해석

한국기계연구원 구조실험동의 진동대기초에 대하여 수치해석을 수행한 후 실제의 강제진동시험의 계측결과와 비교하였다. 기계연구원의 진동대기초는 질량 3357 ton의 Mass 콘크리트블록과 1.4m 간격의 146 본의 풍화암층에 선단지지된 콘크리트 PC 말뚝으로 구성되어 있다. 강제진동시험은 무게 10ton의 진동대에 주파수를 1Hz에서 50Hz로 바꾸어가며 수직방향으로는 0.5g, 수평방향으로는 0.3g의 가속도를 일정하게 가하여 이에따른 콘크리트블록의 수직거동과 수평거동을 가속도계를 사용하여 계측하였다. 그림 5와 표 1에 해석에 사용한 진동대기초의 모형화와 물성치를 보였다.^(23,24)

수치해석결과와 계측결과를 그림 6에 보였다. 수직 및 수평변위에 대하여 공진주파수와 크기가 잘 일치하였으며, 수평방향의 변위에 대하여는 약간의 과대평가된 크기를 보였다. 이는 평면내의 파동전파로 인하여 에너지의 감쇠가 실질보다 적기 때문으로 판단된다.

지반을 강성암반(rigid rock)으로 고려하여 구한 풍화암층의 해석결과와 비교하였다. 강성암반으로 가정하여 구한 수직 및 수평변위는 공진주파수와 크기에 있어서 계측결과와 상당한 차이를 보였다. 따라서 이 예제구조물에 대한 수직 및 수평변위를 구할 경우에는 암반의 강성을 고려해야 하며, 이를 위해 본 연구에서 개발한 2차원 수직 및 모서리무한요소가 매우 효율적임을 알 수 있었다.

9. 결 론

본 논문에서는 평면내에서의 다중파동함수를 고려한 수직 및 모서리 무한요소를 개발하였고, Tzong와 Penzien의 수치해석결과와 비교·검증하였으며, 층상지반에 놓인 스트립 표면기초와 물린 기초에 대하여 매개변수해석을 통하여 지반물성치와 구조물의 형상에 따른 거동을 고찰하였다. 또한 예제해석으로 한국기계연구원 구조실험동의 진동대기초에 대하여 수치해석을 수행한 후 강제진동시험의 계측결과와 비교함으로써 본 연구에서 개발한 2차원 수직 및 모서리무한요소의 효율성을 보였다. 매개변수해석과 예제해석의 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 지반의 포아송비가 증가할수록 지반의 compliance은 전 주파수영역에 걸쳐서 감소하는 경향을 보였으며, 수직변위에 대한 compliance이 가장 크게 감소하였다.
2. 재료감쇠가 증가할수록 균일반무한지반의 경우에는 전주파수영역에서 compliance은 감소하였고, 실수부가 허수부에 비해 두드러지게 감소하였으며, 저주파수영역이 고주파수 영역보다 큰 감소를 보였다. 또한, 층상반무한지반의 compliance의 경우에는 공진주파수의 peak값을 크게 감소시켜 완만한 형태의 compliance을 보였다.
3. 층상지반의 층간강성비가 감소할수록 $c_s^{(2)} / c_s^{(1)}$ 가 1.0인 균일반무한지반의 compliance에 접근하고, 공진주파수의 갯수와 크기가 감소하며, 공진주파수도 저주파수영역으로 이동하였다.
4. 암반위에 놓인 층의 깊이가 증가할수록 공진주파수는 저주파수영역으로 이동하였고, 그 크기는 증가하며, 균일반무한지반의 compliance에 접근하였다.
5. 기초의 물린깊이가 증가할수록 compliance의 크기는 감소하였으며, 암반층상지반의 경우에는 공진주파수가 고주파수영역으로 이동하였다. 이것은 물린 깊이가 증가할수록 기초와 지반과의 접촉면적의 증가로 지반의 감쇠가 증가하고, 암반층상지반의 경우에는 기저층과 기초밀면과의 거리가 감소하기 때문으로 판단된다.
6. 한국기계연구원 구조실험동의 진동대기초에 대하여 계측결과와 수치해석결과를 비교를 통하여 수직 및 수평변위에 대하여 공진주파수와 크기가 잘 일치하고, 수평방향의 변위에 대하여는 수치해석결과가 약간의 과대평가된 크기를 보였다. 이는 2차원 해석시파동의 평면내 전파로 인하여 에너지의 감쇠가 실질보다 적기 때문으로 판단된다. 또한, 지반을 강성암반(rigid rock)으로 고려하여 구한 결과와 비교를 통해 암반

의 강성을 고려해야 하며, 이를 위해 본 연구에서 개발한 2차원 수직 및 모서리무한 요소가 매우 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1995년 한국과학재단의 특정기초연구인 “대형복합역사 구조물의 건설 및 열차운행에 관한 지반-구조물복합계의 해석기술개발”에 대한 연구를 바탕으로 작성되었으며 연구비 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. G. Wass(1972). “Linear Two-dimensional Analysis of Soil Dynamics Problems in Semi-infinite Media,” Ph.D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, California.
2. E. Kausel(1974). “Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media,” Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, Mass.
3. H. Werkle(1986). “Dynamic Finiter Element Analysis of 3-dimensional Solid Models with a Transmitting Element,” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 14, 41-60.
4. J. Lysmer, et al.(1975). “FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems,” Rep. No. EERC 75-30, Univ. of California, Berkley, California.
5. J. Lysmer, et al.(1981). “SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction,” Rep. No. UCB/GT/81-02.
6. T.J. Tzong and J. Penzien(1983). “Hybrid Modelling of Soil-structure Interaction in Layered Media,” Rep. No. UCB/EERC-83/22, EERC, Berkeley, California.
7. Taiwan Power Company & National Center for Research on Earthquake Engrg(1993). “Blind Prediction for Forced Vibration Test (1) of Hualien Project,” Hualien LSST Meeting, Taiwan.
8. J. Dominguez(1978). “Dynamic Stiffness of Rectangular Foundation,” Rep. No. R78-20, MIT.
9. C.C. Spyrakos and D.E. Beskos(1986). “Dynamic Response of Rigid Strip Foundation by Time Domain Boundary Element Method,” Int. J. Numer. Methods Eng. Vol. 23. 1547-1565.
10. S. Ahmad and P.K. Banerjee(1988). “Multi-domain BEM for Two-dimensional Problems in Elastodynamics,” Int. J. Numer. Methods Eng. Vol. 26. 891-911.
11. R.F. Ungless(1973). “An Infinite Element,” M.A.Sc. Dissertation, Univ. of British Columbia.
12. P. Bettles(1977). “Infinite Elements,” Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 11, 54-64.
13. A. Curnier(1983). “A Static Infinite Element,” Int. J. Numer. Methods Eng. Vol. 19.
14. Y.K. Chow, and I.M. Smith(1981), “Static and Periodic Infinite Solid Elements,” Int. J. Numer. Methods Eng. Vol. 17.
15. F. Medina and J. Penzien(1982). “Infinite Elements for Elastodynamics,” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 10, 699-709.
16. Y.K. Chow and I.M. Smith(1981). “Static and Periodic Infinite Solid Elements,” Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 17, 503-526.
17. C. Zhang and C. Zhao(1987). “Coupling Method of Finite and Infinite Elements for Strip Foundation Wave Problems,” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 15, 839-851.
18. C.B. Yun, J.M. Kim(1995). “Axisymmetric Infinite Elements for Multi-Layered Halfspace,” Int. J. Numer. Methods Eng.
19. A.C. Eringen and E.S. Suhubi(1975), Elastodynamics: II. Linear Theory, Academic Press.
20. K.F. Graff(1975), Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State.
21. T.J. Tzong and J. Penzien(1983), Hybrid Modelling of Soil-Structure Interaction in Layered Media, Rep. No. UCB/EERC-83/22, EERC, Univ. of California, Berkeley, CA.
22. J.M. Kim(1995), Development of Axisymmetric Dynamic Infinite Elements Based on Multiple Wave Functions and Its Application to Soil-Structure Interaction Analysis, Ph.D. dissertation, KAIST.
23. 김진근 등(1996). “구조실험동의 구조안전진단,” 연구보고서, UCK006-333.M, 한국기계연구원.
24. 전준수 등(1989). “동역학적 지반특성치의 동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구,” 연구보고서, KRC-87H-J04, 한국전력공사 기술연구원.

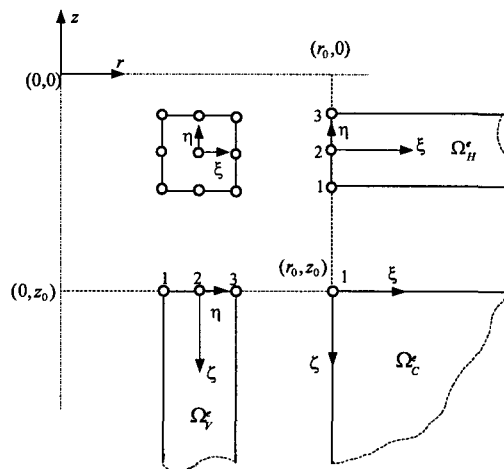


그림 1. 무한요소의 국지좌표계

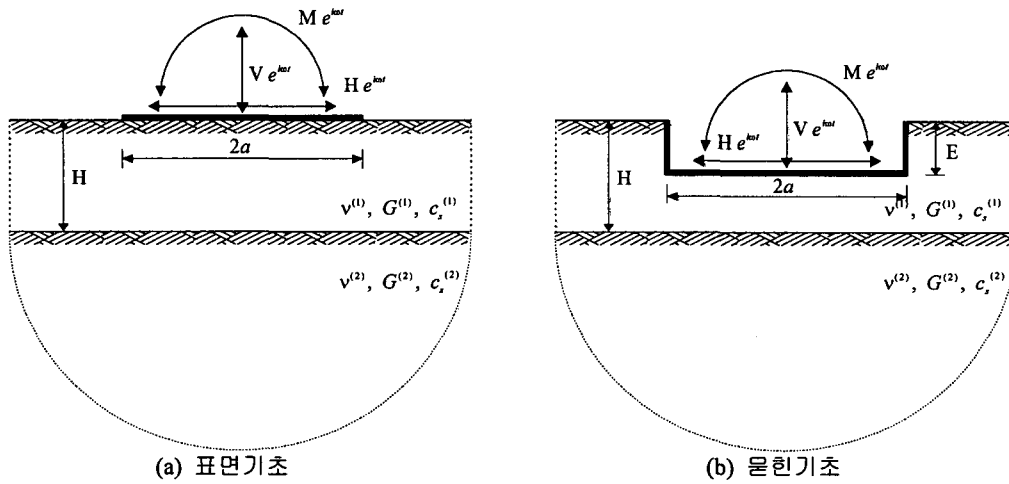


그림 2. 스트립기초

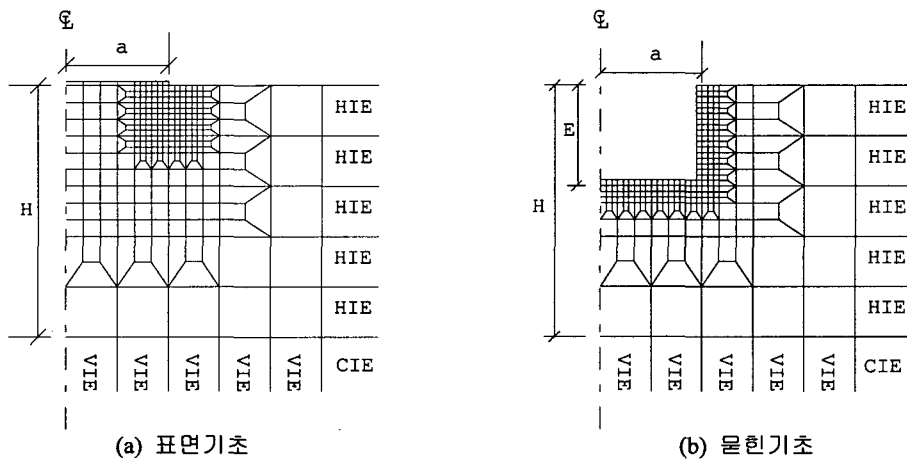


그림 3. 스트립기초의 모형화

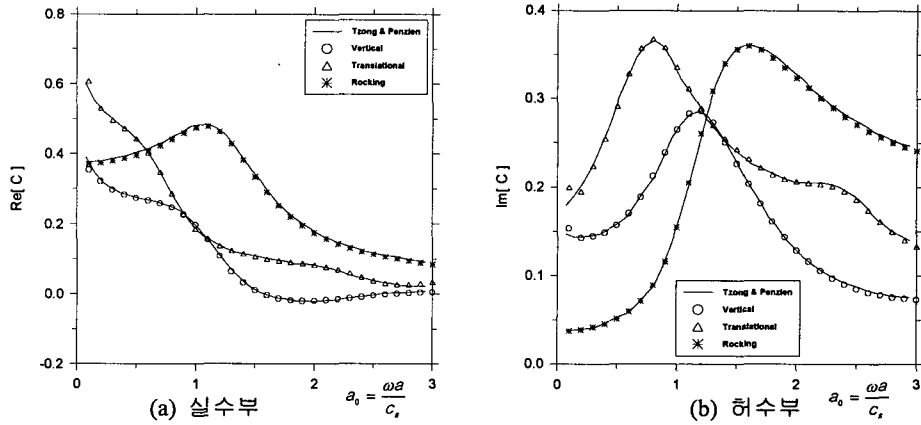


그림 4. 층상 반무한지반상에 놓인 표면기초의 compliance

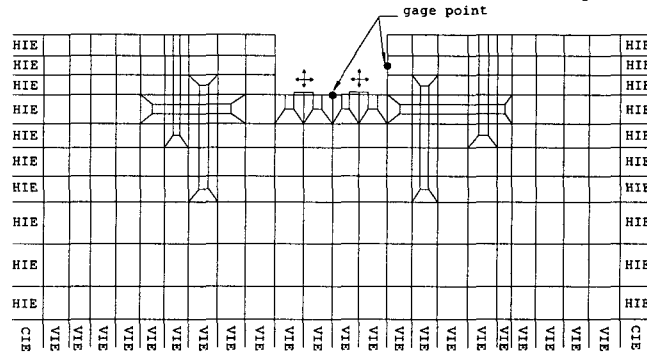


그림 5. 진동대기초의 모형화

표 1. 해석에 사용한 물성치

재료	전단파속도(m/sec)	포아송비	질량(kg/m ³)	재료감쇠비
지반	250.0	0.4	1763.6	0.05
Mass 콘크리트	2530.0	0.25	2446.0	0.02
풍화암	1110.0	0.25	2300.0	0.05
등가 말뚝	330.0	0.39	1778.1	0.23
Gap	1.0	0.4	1.0	0.08
Steel	3200.0	0.3	7850.0	0.02
지중벽	550.0	0.25	2300.0	0.23
기둥	2530.0	0.25	2400.0	0.02

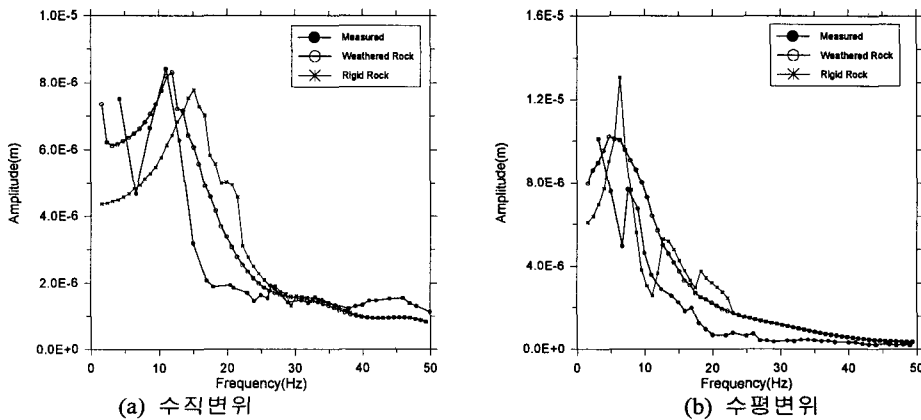


그림 6. 계측된 진동블록의 해석결과와의 비교